

ПАНОРАМНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА НАБЛЮДЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Манин А.П., Васильев В.В., Джуган Р.В, Соколюк В.Л., Фокин А.И.

Рассматриваются особенности построения оптических средств обнаружения, идентификации и оценивания траектории движения БЛА. Определяются свойства панорамных цифровых оптических теодолитов и математическая модель расчёта пространственного положения оптических осей объективов и ориентации светочувствительных цифровых матриц.

Введение

Обнаружение, идентификация и оценивание параметров траектории движения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) является задачей актуальной. Особенность их состоит в том, что они обладают малой эффективной площадью поверхности рассеяния, что затрудняет их обнаружение радиолокационными средствами. Поэтому, наряду с РЛС, используется ряд других средств обнаружения и сопровождения, в частности радиотехнические средства обнаружения БЛА как источника радиообмена информацией, а также оптические средства видимого и инфракрасного диапазонов.

Оптические средства отличаются свойством высокоточного определения параметров траектории движения. В оптическом диапазоне эффективная площадь поверхности рассеяния БЛА существенно выше. Для обнаружения используются и другие особенности оптического диапазона (собственное излучение энергии, энергетические контрасты БЛА и окружающей среды и др.). Однако обеспечение высокой разрешающей способности и точности оценивания движения в оптическом диапазоне с учётом современных фоточувствительных цифровых элементов может быть достигнуто в узкой области наблюдаемого пространства. Вместе с тем неопределённость появления БЛА, высокая угловая скорость их перемещения в ближней зоне требует применения оптических средств с широким полем наблюдения. Это противоречие может быть разрешено применением теодолитов панорамного типа.

Панорамный теодолит – оптическое устройство с совокупностью раздвинутых относительно друг друга объективов, объединённых в единый оптический модуль, предназначенный для точного измерения угловых координат в широком поле наблюдения. Оптическая ось каждого из объективов сдвинута по горизонту и вертикали относительно оптической оси центрального объектива на известную величину.

Как правило оптические оси объективов представляют совокупность лучей, исходящих из общего центра. При другой ориентации объективов приходится учитывать отклонение системы осей от центральной.

На фокальной плоскости каждого объектива установлен фоточувствительный элемент (ПЗС матрица) со строгой ориентацией в пространстве так, чтобы в исходном положении его вертикальная грань была параллельна вертикальной оси теодолита.

Геометрические размеры цифрового фоточувствительного элемента невелики, что создаёт проблему обеспечения большого поля обзора, в котором производится измерения углов, при высоких точностях измерений. В панорамном теодолите преодолевается

противоречие между стремлением увеличить поле активного измерения и сохранить при этом точность измерения.

В панорамном теодолите, как и в обычном, имеется главная вертикальная и горизонтальная оси группового вращения объективов.

На практике приходится направлять оптический модуль в заданную область пространства.

Лучевая ориентация оптических осей создаёт проблему обеспечения заданной точности измерения угловых координат ЛА, а вместе с этим и оценки координат и вектора скорости ЛА. Требуется с очень высокой точностью измерять параметры пространственной ориентации оптических осей. Дополнительные повороты оптико-механического блока (ОМБ), в котором смонтированы объективы, приводят не только к изменению ориентации осей, но и повороту светочувствительных матриц (в частности, ПЗС матриц) относительно оптической оси. Не учёт этого обстоятельства, приводит к существенным погрешностям измерений и определения параметров траектории ЛА. Так, например, при разведении осей объективов на 10 угловых градусов и повороте ОМБ по вертикали на 50 угловых градусов ПЗС матрица поворачивается на угол 15 угловых градусов. Если игнорировать этот поворот, то погрешность измерения угловых координат становится неприемлемой. Для устранения погрешности необходимо опираться на математическую модель объектива с заданной начальной ориентацией оптической оси в пространстве.

Математическая модель расчёта параметров ориентации оси объектива и ПЗС матрицы

Введём следующие связанные системы координат:

1) Система координат теодолита

Начало системы координат теодолита (СКТ) «0» находится на условной точке пересечения горизонтальной и вертикальной осей вращения ОМБ.

Ось 0ξ размещена на горизонтальной плоскости и направлена на север;

Ось 0η направлена вверх по отвесу;

Ось 0ζ дополняет систему до правой.

2) Система координат подвижного ОМБ

Ось $0x$ находится на линии, соединяющей начало «0» с заданной точкой пространства (например, точка ожидаемого появления наблюдаемого объекта).

Ось $0y$ находится в вертикальной плоскости, проходящей через «0» и заданную точку пространства.

Ось $0z$ дополняет систему до правой.

Система координат объектива.

Ось $0Z$ находится на оптической оси объектива, размещённого в ОМБ под заданными углами в горизонтальной α_l и вертикальной плоскостях β_l относительно оси $0x$.

3) Система координат ПЗС матрицы.

Матрица размещена на фокальной плоскости объектива, её центр совпадает с фокальной точкой «ф»

Ось $0y_m$ проходит через фокальную точку, ортогональна оптической оси и в исходном состоянии параллельна оси $0y$ и столбцам матрицы.

Ось $0x_m$ параллельна строкам матрицы.

Введём операторы поворота систем координат объектива Φ_0 и оптического модуля Φ_m . Они являются функцией углов поворота оптической оси по азимуту α_0 и углу места β_0 и, соответственно, углов поворота оптического модуля в целом по азимуту α_m и углу места β_m .

Операторы поворота систем координат описываются следующим образом.

Оператор поворота объектива: $\Phi_o = P_o \cdot F_o$, где

$$P_o = \begin{bmatrix} \cos \alpha_o & 0 & -\sin \alpha_o \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_o & 0 & \cos \alpha_o \end{bmatrix}; F_o = \begin{bmatrix} \cos \alpha_o & -\sin \alpha_o & 0 \\ \sin \alpha_o & \cos \alpha_o & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Оператор поворота оптического модуля: $\Phi_M = P_M \cdot F_M$;

где

$$P_M = \begin{bmatrix} \cos \alpha_M & 0 & -\sin \alpha_M \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha_M & 0 & \cos \alpha_M \end{bmatrix}; F_M = \begin{bmatrix} \cos \alpha_M & -\sin \alpha_M & 0 \\ \sin \alpha_M & \cos \alpha_M & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Используя эту модель, можно решить задачу определения ориентации оптической оси и ПЗС матрицы при смещении оптического модуля на некоторый дополнительный угол $\beta_{\text{доп}}$ по углу места

Для этого введём вектор R_1 вдоль оптической оси и сдвинутый относительно него на некоторый угол вектор R_2

$$R_1^T = [r \ 0 \ 0];$$

$$R_2^T = [r \ 0 \ z];$$

Определим координаты вектора R_1 в системе координат теодолита

$$R_{1M} = \Phi_M^{-1} \Phi_o^{-1} R_1$$

Учитывая координаты вектора в системе координат теодолита

$R_{1T}^T = [\xi_1 \ \eta_1 \ \zeta_1]$, определяем углы ориентации оптической оси объектива

$$\alpha = \arctg \left(\frac{\zeta_1}{\xi_1} \right); \beta = \arctg \left(\frac{\eta_1}{\sqrt{(\xi_1^2 + \zeta_1^2)}} \right). \quad (3)$$

Учитывая координаты вектора R_2 в системе координат развёрнутого объектива

$R_{2O}^T = [z_{2O} \ y_{2O} \ x_{2O}]$, определяем угол поворота цифровой матрицы.

$$\omega = \arctg \left(\frac{y_{2O}}{x_{2O}} \right). \quad (4)$$

Для этого используем операторы поворота систем координат

$$P_T = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 & -\sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{bmatrix}; F_T = \begin{bmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$\Phi_L = F_T P_T$$

и определим координаты вектора R_{2O} в системе координат развёрнутого объектива,

$$R_{2T} = \Phi_L \Phi_M^{-1} \Phi_o^{-1} R_2.$$

Определение признаков угрожающего движения БЛА

Одной из задач наблюдения БЛА является определение признаков возможного нарушения правил полёта, которое может привести к несанкционированному попаданию в охраняемую территорию.

Таковыми признаками являются, в частности, принадлежность прямой, построенной вдоль вектора скорости в некоторый момент времени (или касательной к траектории движения) защищаемой области

$$g \subset W_{\text{защ}},$$

где g – координаты на прямой прогнозируемого движения;

$W_{\text{защ}}$ – защищаемое пространство

Для этого необходимо в некоторый характерный момент времени, например, момент смены направления движения или изменения ускорения, оценить ориентацию вектора скорости в пространстве и определить принадлежность траектории вдоль вектора скорости защищаемому пространству. Принципиально, такую задачу можно решать с заданным темпом времени постоянно. Но целесообразно наряду с этим выявлять момент времени начала угрожающего манёвра для увеличения большего внимания и объёма защитных процедур.

Для определения вектора скорости БЛА можно воспользоваться важной особенностью цифровых фоточувствительных матриц, заключающуюся в том, что можно с высокой точностью оценивать разность координат матрицы между опорной точкой и изображением объекта наблюдения [1]. Измеряя в одни и те же моменты времени разности координат на цифровой матрице для двух и более патрульных теодолитов, можно вычислить параметры вектора скорости. Условно задачу можно разделить на две вычислительные процедуры, решающие задачу в реальном темпе времени. Первая процедура определяет разности декартовых координат БЛА и определяет начальную точку для прогноза. Вторая процедура определяет по совокупности разностей координат составляющие вектора скорости.

Алгоритм первой процедуры описывается в форме метода наименьших квадратов

$$\Delta g^* = [\Phi^T N^{-1} \Phi]^{-1} \tilde{\Phi}^T N^{-1} M \lambda, \quad (5)$$

где λ – матрица столбец, элементами которого являются измерения отклонений изображения БЛА от центра цифровой матрицы;

Δg^* – матрица-столбец искомых оценок отклонений координат БЛА от опорных точек;

Φ и $\tilde{\Phi}$ – матрицы частных производных, формируемая на основе операторов преобразования (1);

N – корреляционная матрица погрешностей измерения.

Алгоритм вычисления вектора скорости в простейшем виде:

$$V(t) = \frac{g(t) - g(t-T)}{T},$$

где T – фиксированный отрезок времени.

Для более точного определения скорости используется алгоритм сглаживания по МНК.

Определение начала угрожающего манёвра возможно, как минимум, двумя способами.

При первом способе непрерывно по совокупности результатов измерений двух и более теодолитов вычисляется вектор ускорений. При появлении факта изменения скорости принимается решение о детальной обработке измерений.

Во втором способе анализу подвергается движение изображения на цифровой матрице. Изменение курса движения БЛА определяется по траекториям изображения на цифровых матрицах. Признаком изменения курса является изменение приращений движения изображения.

Анализ практических примеров построения теодолитов панорамного типа

Существует два типа построения цифровых панорамных теодолитов.

Первый тип основан на применении цифровых видеокамер со смещёнными ПЗС матрицами, позволяющими перекрыть поле зрения с помощью нескольких объективов, оптические оси которых параллельны [2]. Такое построение существенно упрощает обработку результатов измерений, но требует специфичного построения видеокамер. Примером такого построения является модификация оптической системы ФРС-2 («Дятел»), осуществлённая ОАО НПИЦ «Арминт». Этой организацией было предложено многолучевое построение теодолита [3], которое независимо было реализовано в оптической системе ТРС ОАО «Пеленг» (РБ) и в модифицированном образце оптической системы 9Ш320 («Конгломерат – 1П»).

Основные технические характеристики панорамного теодолита модифицированного образца оптической системы 9Ш320 («Конгломерат – 1П»).

- количество оптических каналов наблюдения – 5 (четыре измерительные, один обзорный);
- общее поле наблюдения измерительных каналов фокусным расстоянием 50 мм – 25 x 25 угловых градуса;
- поле наблюдения обзорного канала с фокусным расстоянием 25 мм – 25 x 25 угловых градуса;
- разрешающая способность – 22 угловых секунды, что позволяет обнаружить БЛА с размером 0,5 м между его максимально удалёнными точками на расстоянии 3 км.

Комплекс из двух и более теодолитов позволяет определить местоположение и составляющие вектора скорости БЛА на расстоянии 3000 м и интервалом сглаживания 10 с, СКП измерения скорости, не превышающей 3 см/с. Для уменьшения интервала сглаживания необходимо увеличивать фокусное расстояние, а для сохранения при этом поля обзора – увеличивать количество измерительных каналов.

Для построения оптических систем панорамного типа с повышенной разрешающей способностью требуется использовать объективы с фокусным расстоянием более 100 мм. Соответственно возрастает число оптических каналов и возникает задача выбора их оптимальной топологии.

Пути повышения достоверности обнаружения БЛА

Из возможных методов повышения достоверности обнаружения отметим три:

- дифференциальный метод селекции подвижного объекта наблюдения;
- интегральный метод селекции траектории подвижного объекта наблюдения;
- совместный интегро-дифференциальный метод идентификации объекта наблюдения [4].

Сущность дифференциального метода состоит в цифровом по пиксельному вычитании изображения следующего кадра и предыдущего. Все неподвижные объекты наблюдения исключаются, сохраняется движущийся объект.

При интегральном методе цифровое сложение изображений нескольких подряд кадров позволяет обнаружить упорядоченную линию движения изображения подвижного объекта. Вероятность обнаружения линии на изображении кадра существенно выше, чем одиночного изображения объекта на кадре.

Совместное применение того и другого методов позволяет повысить достоверность обнаружения и идентификации объекта по признакам подвижного объекта.

Следует выделить особый случай, когда объект движется вдоль постоянного пеленга (на теодолит). На изображении такой объект не подвижен. Но если учесть, что оценивание

движения БЛА возможно при использовании двух и более разнесённых в пространстве теодолитов, то это препятствие преодолевается при совместном анализе информации.

Заключение

К настоящему времени существуют технические и математические средства для решения задач обнаружения, идентификации и оценки параметров траектории движения БЛА. Описанные в статье методические и математические приёмы позволяют увеличивать достоверность и точность вычисления параметров движения БЛА, необходимые для воздействия на них в случае нарушения ими условий допустимого движения.

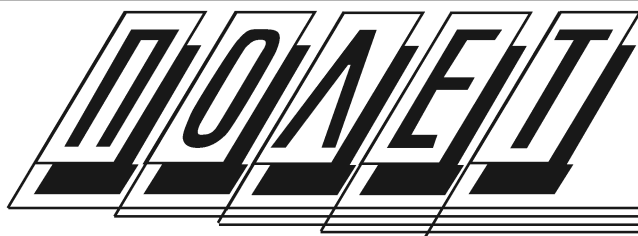
Литература

1. Васильев В.В., Джуган Р.В., Манин А.П., Соколюк В.Л. Возможности повышения точности определения навигационных параметров систем обеспечения посадок самолётов. М., «Машиностроение-Полёт», ОНТЖ «Полёт», 2017 г., №11-12, стр. 26-30.

2. Манин А.П., Васильев В.В., Трубицын А.С, Аношкин А.В. ФИПС Электронно-цифровое устройство измерения угловых координат. Патент № 2343407 от 10 января 2009 г.

3. Манин А.П., Васильев В.В., Орловский В.П. ФИПС. Электронно-цифровое устройство измерения угловых координат быстро движущихся объектов. Патент № 2324199 от 10 мая 2008 г.

4. Манин А.П., Васильев В.В., Малахов А.Н. Электронно-цифровое устройство измерения угловых координат с дифференциальной и интегральной селекцией подвижных объектов наблюдения. ФИПС. Патент № 2561310 от 5 марта 2014 г.



АВИАЦИЯ ♦ РАКЕТНАЯ ТЕХНИКА ♦ КОСМОНАВТИКА

Орган Российской академии космонавтики имени К.Э. Циолковского
и Академии наук авиации и воздухоплавания

Журнал выходит ежемесячно
Выпускается с августа 1998 г.

Г.В. НОВОЖИЛОВ – главный редактор,
академик РАН

Члены
редакционной
коллегии

А.А. АЛЕКСАНДРОВ,
д.т.н., проф.

А.П. АЛЕКСАНДРОВ,
к.т.н., летчик-космонавт

Б.С. АЛЕШИН,
академик РАН

Б.В. БАЛЬМОНТ,
академик РАКЦ

М.В. ГОРДИН

В.Г. ДМИТРИЕВ,
чл.-кор. РАН

Б.И. КАТОРГИН,
академик РАН, проф.

А.А. ЛЕОНОВ,
к.т.н., летчик-космонавт

А.М. МАТВЕЕНКО,
академик РАН, проф.

С.В. МИХЕЕВ,
академик РАН

Н.Ф. МОИСЕЕВ, к.т.н.

М.А. ПОГОСЯН,
академик РАН, проф.

И.Б. ФЕДОРОВ,
академик РАН

Е.А. ФЕДОСОВ,
академик РАН, проф.

В.В. ХАРТОВ,
д.т.н., проф.

С.Л. ЧЕРНЫШЕВ,
академик. РАН, проф.

Редакционный совет

А.М. МАТВЕЕНКО,
председатель редсовета,
академик РАН, проф.

О.М. АЛИФАНОВ,
чл.-кор. РАН, проф.

И.В. БАРМИН,
чл.-кор. РАН, проф.

В.Е. БАРСУК, д.т.н.

В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ,
д.т.н., проф.

О.Ф. ДЕМЧЕНКО, к.э.н.

Н.Н. ДОЛЖЕНКОВ, д.т.н.

С.Ю. ЖЕЛТОВ,
академик РАН

Л.М. ЗЕЛЕННЫЙ,
академик РАН, проф.

А.Н. КИРИЛИН, д.т.н.

В.А. КОМАРОВ, д.т.н.

А.А. КОРОТЕЕВ,
академик РАН

В.П. ЛОСИЦКИЙ, инж.

Л.Н. ЛЫСЕНКО,
д.т.н., проф.

А.П. МАНИН, д.т.н.

К.М. ПИЧХАДЗЕ,
д.т.н., проф.

С.С. ПОЗДНЯКОВ, инж.

В.Г. СВЕТЛОВ, д.т.н.

А.Н. СЕРЬЕЗНОВ, д.т.н.

В.П. СОКОЛОВ,
д.т.н., проф.

В.А. СОЛОВЬЕВ,
чл.-кор. РАН, проф.,
летчик-космонавт

В.В. ШАЛАЙ,
д.т.н., проф.

В.А. ШАТАЛОВ,
летчик-космонавт

Редактор-организатор
О.С. РОДЗЕВИЧ

Ответственный секретарь
О.Г. КРАСИЛЬНИКОВА

Спец. корреспондент
В.П. ЛОСИЦКИЙ

Учредитель и издатель
ООО «Машиностроение–Полет»

© ООО «Машиностроение–Полет», 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Манин А.П., Васильев В.В., Джуган Р.В., Соколюк В.Л., Фокин А.И. Панорамные оптические средства наблюдения беспилотных летательных аппаратов 3

Ахрамович С.А., Малышев В.В., Старков А.В. Математическая модель движения беспилотного летательного аппарата в бикватернионной форме 9

Тарасов А.Т., Петухов С.В., Латышов Р.А. Крылатый космодром для туристической многоразовой авиационно-космической системы 21

Горовцов В.В., Жиряков А.В., Тепелев П.П., Петров Ю.А., Берников А.С., Макаров В.П. Исследование динамики раскрытия трансформируемых конструкций в процессе проведения испытаний 30

Шеваль В.В., Рожнин Н.Б. Формирование структуры бортовой системы сопровождения при плоском представлении полета 39

Шибанов Г.П. Система возбуждения тактового генератора автоматических средств контроля летательных аппаратов 46

Палкин М.В., Лавренов А.Н. Приложения системного подхода при управлении группировками космических аппаратов 51

Безъязычный В.Ф., Растегаев Е.В. Теоретические положения по организации параллельной инженерной разработки в производстве газотурбинных двигателей 58

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней.

Мнение редакции не всегда совпадает с точкой зрения авторов статей. За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель. Плата с аспирантов за публикацию статей не взимается. Аннотации статей журнала и требования к оформлению предоставляемых авторами рукописей приведены на сайте <http://ros-polet.ru>

Адрес редакции: 107076, РФ, г. Москва, Стромьинский пер., 4
Телефон: 8 (499) 269-54-97; +7-926-916-03-58
Адрес электронной почты: rosपोlet@mail.ru
Адрес в интернете: <http://ros-polet.ru>